

CNIC-01389

CAEP-0027

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

高空核爆炸和美苏高空核试验的述评

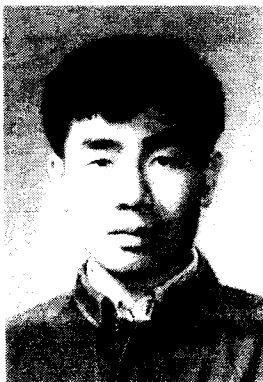
**A BRIEF INTRODUCTION TO HIGH ALTITUDE
NUCLEAR EXPLOSION AND A REVIEW
ON HIGH ALTITUDE NUCLEAR TESTS
OF USA AND FORMER USSR**

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press



孙景文：中国工程物理研究院科技信息中心研究员，1964年毕业于哈尔滨工业大学精密仪器系。

SUN Jingwen: Professor of Centre of Science and Technology Information, China Academy of Engineering Physics. Graduated from the Department of Precision Instrument, Haerbin Institute of Technology in 1964.

CNIC-01389
CAEP-0027

高空核爆炸和美苏高空核试验的述评

孙景文

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

介绍了美苏高空核试验的概况、高空核爆炸产生的物理现象、以及高空核爆炸对空间飞行器、卫星及通讯的影响; 阐述了高空核爆炸的反导机制并评估了美苏高空核试验的效果与作用。

A Brief Introduction to High Altitude Nuclear Explosion and A Review on High Altitude Nuclear Tests of USA and Former USSR

(In Chinese)

SUN Jingwen

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

The author briefly introduces some knowledge about high altitude nuclear explosion (HANE) and presents a general review on high altitude nuclear tests of USA and former USSR. Physical phenomenon generated by HANE is given. The effects of HANE on space flyer, artificial satellite and communication are discussed. Some aspects of a mechanism of antimissile for HANE are described and the effect and role of HANE for USA and USSR are reviewed.

引言

二次大战后，由于美苏两国奉行冷战政策，到了 50 年代，世界上基本形成了分别以美苏两个超级大国为首的两大阵营对峙的战略格局。美苏两国都竞先研制大量的热核武器，双方都分别拥有数百枚洲际弹道导弹 (ICBM)。1961 年 10 月 30 日苏联在新地岛上空爆炸了一颗 5000 万吨级的热核武器，它是世界上当量最大的热核试验。为此美国战略防御局变得更加担心，这样大规模的核武器在空中爆炸，它的冲击波和热效应似乎没有什么军事价值，但是美国防御局迅速作出推测——俄罗斯人想要利用辐射效应作为防空和反弹道导弹用途。

1958 年以来，美苏双方都在积极探索“以核反核”的防御手段。五六十年代，美苏的反导方式都是建立在预警雷达基础上的。在莫斯科防区苏联建立了“橡皮套鞋”反导系统；在华盛顿防区美国建立了“卫兵”反导系统，双方的导弹发射井都是指向对方，造成了一触即发的局面。美国 60 年代的“卫兵”系统，以大型相控阵雷达驱动，核奈克-X (NIKE-X) 拦截器为该系统的中心部件。“卫兵”系统对于直接攻击是脆弱的，主要是由于它们的探测系统——用于远距离监测和跟踪的雷达庞大而又不能机动。双方都面临既要反导又要研究突防措施的问题，因此美苏高空核试验的主要目的有四点：(1) 研究反弹道导弹问题；(2) 研究与解决核弹头的突防问题；(3) 研究高空核试验对通讯、雷达与航空电子学设备的影响；(4) 进行一系列的科学研究。高空核爆炸可以产生很多地球物理现象，可模拟类似的自然现象，探索自然规律。

美国在 1958 年进行了五次高空核试验，在相隔 4 年之后的 1962 年又恢复了高空核试验。当时，美国总统肯尼迪在解释为什么要恢复高空核试验时说：“我们正在雷达上花费大量的金钱来加强我们的防御，发展可能的反导系统，……但是我们不能肯定由于核爆炸效应会有多少（设备）停止工作而成为废品，包括黑暗、无效或是破坏。”由此可见，高空核爆对电子预警系统的破坏效应的研究是美国 1962 年一系列高空核试验的主要目的。

本文通过对美苏高空核试验历史的回顾，探讨高空核爆产生的物理现象及高空核爆对空间飞行器、航空电子设备与雷达、通讯的影响，描述了高空核爆的反导机制并且评估了美苏高空核试验的效果与作用。

1 美苏高空核试验概况

1963 年 8 月 5 日，美、苏、英三国在莫斯科签订了三国大气层核禁试条约。在这之前，美国一共进行了 15 次高空核试验，苏联进行了 10 次，具体情况见表 1 和表 2。

美国的 15 次高空核试验，得到数据的主要是 4 次：麻栗树 (Teak)、海盘车 (Starfishprime)、超级蓝鳃太阳鱼 (Bluegill triple) 和王鱼 (Kingfish)。失败了 4 次。1985 年 8 月 1 日代号为“麻栗树”的高空 (76.2 km) 核爆炸，当量为 380 万吨，爆后形成的火球以及明亮的红色球形波如图 1 所示。爆后造成高频无线电通讯和雷达通讯中断，将距爆点 555 km 处的兔子视网膜烧伤。当“麻栗树”爆炸时，在夏威夷岛地平线上空看见一道锐利明亮的闪光。

表 1 美国高空核试验概况¹⁾

时间	爆高 / km	当量 / kt	目的	试验结果
1958-08-01	76.2	3800	研究反导破坏机制、测量能量分配、破坏效应	高频无线电通讯和雷达通讯中断、部分破坏了 555 km 外的动物视力
1958-08-12	48.8	3800	为飞机、反弹道导弹提供实验数据	无线电通讯受到数小时干扰, 部分破坏了 500 km 外的动物视力
1958-08-27	约 480	1~2	科学研究, 研究人造辐射带	为搜集试验结果发射了两颗卫星 Exploser IV 和 V
1958-08-30	约 480	1~2	科学研究, 研究人造辐射带	为搜集试验结果发射了两颗卫星 Exploser IV 和 V
1958-09-06	约 480	1~2	科学研究, 研究人造辐射带	为搜集试验结果发射了两颗卫星 Exploser IV 和 V
1962-05-06	/	500	研究武器系统	
1962-06-04	48			失败
1962-07-09	400	1400	测定高空核爆炸在破坏电子预警系统、防御敌方导弹袭击方面的作用	爆炸使美通讯中断 20 min, 使美卫星上的太阳能电池失效, 距爆点 1200 km 的夏威夷看到明亮的闪光
1962-07-25	48	>1000		失败
1962-10-15	60	低		失败
1962-10-20	56	低	研究对通讯系统的影响	
1962-10-26	50~60	<1000	研究对通讯系统的影响	通讯系统在爆后 3~4 min 恢复
1962-11-01	32~48	<1000	宣布禁区地面半径 320 km, 高空半径 535 km	
1962-11-04	56	低	研究突防和反导弹弹头	

注: 1) 美国共做了 15 次高空核试验, 表中只列出 14 次, 还有一次因试验失败, 而且试验时间不详故未列出。

表 2 苏联高空核试验概况

时间	地点	条件	当量 ²⁾ / kt	试验目的
1957-01-19	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	空中 ¹⁾	10	效应
1958-11-01	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	空中 ¹⁾	10	效应
1958-11-03	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	空中 ¹⁾	10	效应
1961-09-06	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	空中 ¹⁾	11	效应
1961-10-06	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	空中 ¹⁾	40	效应
1961-10-27	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	外空	1.2	效应
1961-10-27	火箭试验场 (Р И П) “卡普斯亭-亚尔”	外空	1.2	效应
1962-10-22	Р И П	外空	300	效应
1962-10-28	Р И П	外空	300	效应
1962-11-01	Р И П	高空	300	效应

注: 1) 据美国有关文献报道, 苏联进行了 14 次高空核试验, 但据《苏联核试验》(И. А. 安德留申著)一书所载, 苏只承认做了 5 次高空核试验, 把在火箭发射场发射的次数(空中)加上, 总计 10 次。

2) kt 为千吨 TNT 当量。

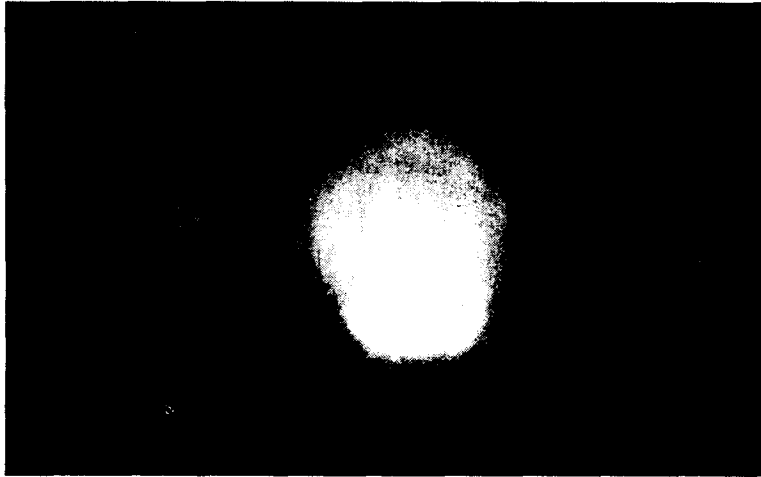


图1 当量为380万吨TNT的“麻栗树”核试验在高空76.2 km爆炸后形成的火球^[1]
(本照片是从夏威夷岛——离爆炸点1255 km拍摄的)

2 高空核爆炸物理现象

高空核爆炸是指爆高在30 km以上的核爆炸，在这个高度以上空气非常稀薄，因为从海平面直到海拔高度130 km的高空大气密度可以相当精确地表示为 $\rho = \rho_0 10^{-(H/15.94)}$ ， H 为海拔高度(km)， ρ_0 为海平面空气密度，即高度每增加16 km，密度就减少一个数量级。由于空气密度的剧烈变化，高空核爆炸现象与地面爆炸、低空爆炸显著不同，尤其是在80 km高度以上的核爆炸。

2.1 火球现象

爆高在80 km以下与80 km以上的火球现象有着明显的不同。80 km以下爆炸的火球现象与低空爆炸相似，形成以爆点为中心的不断扩大的火球，但它比低空爆炸的火球大得多，而且发展也快得多。例如，百万吨级的低空爆炸，其火球最大半径约1 km左右。而“麻栗树”高空核试验的火球增长很快，在0.3 s时火球半径为8.9 km，到3.5 s时火球半径就增长到14.5 km。火球既垂直上升又水平扩张，这种上升扩张是非对称的。火球上升速度约为1 km/s，而水平扩张速度为300 m/s，火球外边有个红色发亮球，它是由冲击波通过低密度空气激发空气发光而产生的。爆后380 s，裂变烟云的半径为380 km，烟云的中心却上升到了400 km。由于爆高高，可见范围也很大。对于30 km的高空核爆炸，可见范围达700 km。而在50 km的高空核爆炸，可见范围可达1000 km^[2, 3]。

从火球形成过程来看，低于30 km的空中爆炸，在爆炸瞬间，弹体温度高达 10^7 K，爆炸能量70%为X射线所占有，辐射的X射线波段为1~10 keV，在地面的大气中，这种X射线的平均自由程极短，只有米的量级，在传输过程中把全部能量用于加热周围的空气，形成了一个高温高压的空气团，叫做“等温球”，即火球。火球迅速向外膨胀，压缩周围的空气形成冲击波，同时向外发出热辐射。这样，X射线能量几乎全部转化成光辐射和冲击波的能量。空气在加热过程中化学成分的变化引起光学性质变化，因此在低空爆炸中形成了两个热脉冲。

30 km 以上，由于空气稀薄，热激波不足以形成阻挡层，因此没有温度最小值，热辐射是单脉冲。

在 80 km 以上的高空核爆炸，空气变得更加稀薄， $\rho/\rho_0 \approx 10^{-5}$ ，相应的 X 射线自由程增加了 10^5 倍；若爆高为 100 km，弹体温度仍为 10^7 K，X 射线的平均自由程大于 100 km，在这种情况下火球有了很大的变化。

对于高空核爆炸产生的 X 射线，它的平均自由程可用下式确定：

$$\bar{l} = \frac{10(kT_x)^3}{\rho/\rho_0} \quad (1)$$

式中， k 为玻尔兹曼常数， 8.62×10^{-8} keV/K， T_x 为弹体温度， ρ 为爆炸高度处的空气密度。所谓平均是对普朗克谱分布的平均。

一颗百万吨级的核装置在 80 km 以上的高空发生核爆炸之后，X 射线可以自由穿出，在一瞬间 ($< 1 \mu\text{s}$) 占总能量 70% 的 X 射线全部释放完毕，产物火球以极高的速度向外膨胀，核弹爆炸时的初始火球释放的大量 X 射线被 80 km 附近的空气所吸收，80 km 附近的空气剧烈升温，形成一个厚度为 10~15 km 的圆盘状燃烧的空气层，称为燃烧火球，半径约为爆高（如 $H=100$ km）减去 80 km，则燃烧火球的半径约为 20 km，火球的厚度与核装置的当量有关。不同爆高形成的火球近似形状如图 2 所示。燃烧的火球向外发出热辐射，其持续时间比产物火球要长得多，可持续几分钟之久。同时它将驱使产物火球与后期烟云迅速上升。一般说来，燃烧火球的温度分布与当量、爆高有关。火球的内能不到 X 射线总能量的 1/4，X 射线的其余能量都消散于外层空间，所以火球的初始温度很低。若爆高为 100 km，当量为 100 万吨，则火球的初始平均温度小于 2000 K。以“麻栗树”试验为例，它的 X 射线火球半径为 4~5 km，初始平均温度为 82000 K。

火球的再辐射并不是所有频段都能达到地面的，206~310 nm 波段的辐射被分布于离地面 20~40 km 的臭氧 (O_3) 所吸收；短于 206 nm 的辐射被周围的 N_2 ， O_2 吸收；大于 1908 nm 的辐射则被大气层低层的 CO_2 ， H_2O 蒸汽所吸收。因此，在火球的再辐射中，只有 310~1908 nm 的光子才能穿过大气层传至地面，这个波段称为“大气窗口”。据有关的计算估计，真正能进入大气窗口的能量只占火球再辐射总能量的 1/4 左右。就对地面的光冲量贡献而言，高空核爆的效率并不比低空核爆的效率低。在“麻栗树”高空核试验时，爆点下方投影点处的光冲量只有 $1.2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ 。在高空核爆炸时，地面光冲量只有一个脉冲，大部分能量在很短的时间内便辐射出来。在“麻栗树”试验中，在爆后 0.06 s 时，地面光冲量已接受到一半。

对于 100 km 以上的高空核爆炸，造成人眼伤害的主要光源是极高温的弹体瞬时辐射（即强烈闪光）中的可见光波段，尽管它只占总能量产额不到 10^{-5} 。当然还要考虑火球辐射中的可见光的贡献。对于双百试验（100 km 爆高和 100 万吨 TNT 当量），如果人眼的安全标准取 $0.05 \text{ cal}/\text{cm}^2$ ，则白天的安全边界为 300 km 以外，晚上的安全边界在 600 km 以外。

* $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$

30 km 爆高是高空核爆炸的高度下限，随着爆高的增加，使核装置的爆炸特性产生显著的变化，图 3 给出爆炸高度对火球发展的第一阶段的影响^[4]。

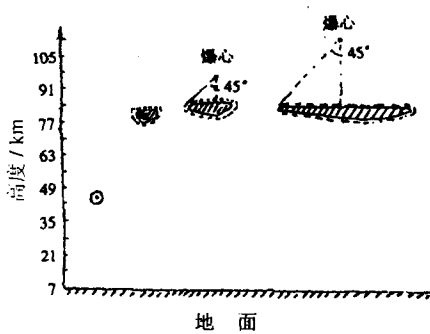


图 2 高空核爆炸火球随高度变化的近似形状

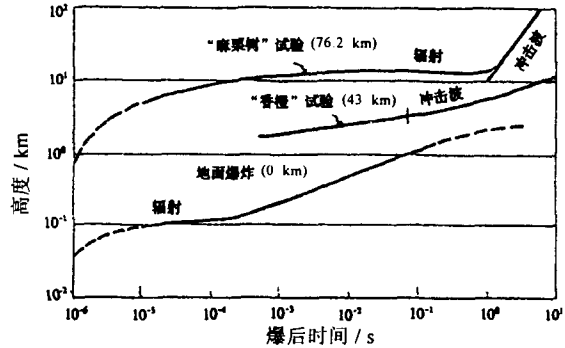


图 3 高度对火球发展的第一阶段的影响

2.2 冲击波

80 km 以上的高空核爆炸能量分配与低空核爆炸的能量分配显著不同（见表 3）。在低空爆炸中，总裂变能量中约有 50% 的能量以冲击波形式出现，35% 的能量为热辐射能。随着爆高的增加，爆炸能量的分配也有显著改变。在低空爆炸时，在火球中包含的极热气体的初始膨胀在空中形成冲击波，在地面零点以高速向外传播，在运动的波前处压力最高，而在爆炸的内区压力下降。有两种压力与冲击波波前相关，一个是超压力（所谓“超压”即超过大气压力），理想地由正压和紧跟着的负压阶段组成，而另一个是动力压，它是由在冲击波波前的后面的大量空气流（风）形成的。值得注意的是当冲击波的超压力为 3447 Pa 时，大多数结构物就会受到某些破坏。典型的冲击波压力-时间关系曲线如图 4 所示^[5]。但是到了高空（80 km）因为很少有空气作为冲击波活塞在起作用，冲击波对内火球的屏蔽效应比在低空爆炸的情况持续时间短，因此很快到达最小功率点。虽然，冲击波的直接屏蔽效应在高空减少，但由于大气密度减少从而使严重的冲击波效应比在海平面传播的距离远，并可以产生一个由 NO, NO⁺ 和 N₂⁺ 等气体构成的巨大的热层。

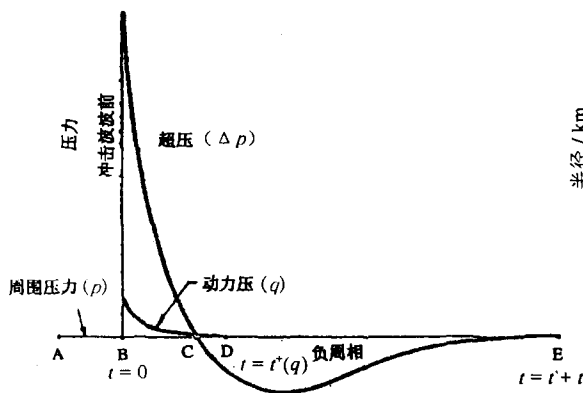


图 4 在低于 5psi (34474 Pa) 的低压区冲击波的压力-时间关系曲线

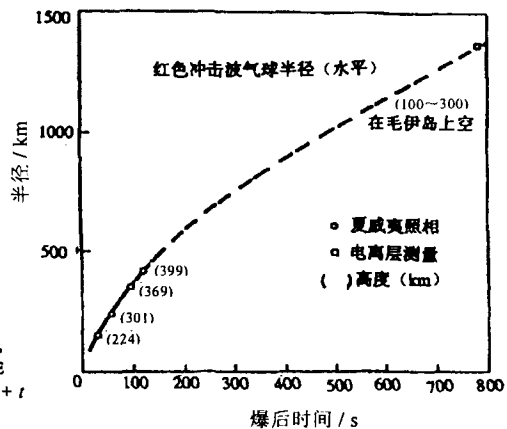


图 5 红色冲击波气球半径（水平方向）随爆后时间的变化

表3 高空核爆炸与低空核爆炸的能量分配比较

(%)

高度	γ 射线	中子	β 粒子	X射线	光辐射(紫外、可见、红外)	冲击波	剩余核辐射
低空	约0.3	约1	约2		35	50	10
80 km 以上	约0.3	约1	约2	70	5	约5	10

冲击波的能量随着爆高的增加而减少,这是由于初始热辐射能因加热不同密度的空气而不同,因而在单位体积中形成冲击波阵面也就不同。与低空爆炸相比,高空核爆形成的冲击波强度较弱,而且速度也较慢。

另一个非常值得注意的物理现象是在高空核爆中形成一个巨大的红色冲击波“气球”,这个最大的容易观测的形成物与火球有联系^[6](见图5)。

80 km 以上的高空核爆炸也会产生力学效应-微压波和声波,它们能绕地球转几周,持续几天时间,但它们的能量很低^[7]。

2.3 核辐射

在任何核爆炸过程中,能量都以冲击波、热辐射和核辐射的形式释放出来。这种能量释放可以由裂变过程、聚变过程而引起或由裂变-聚变这两种过程的联合而引起。在这两种过程中,有一种净的质量损失,这种质量是以能量的形式出现的,同时有中子和 γ 射线的特征发射。由这两种过程的任何一个引起高温,接着引起很大的压力增长,因此迅速膨胀并产生冲击波。在表4中给出在很重要的自由空间或在真空情况中出现的大致能量分配及各种辐射的相关性质(表中未考虑缓发裂变产物)。

表4 在自由空间或真空中核爆炸的能量产额及各种辐射的相关性质

发射类型	炸弹能量份额	路径	速度 / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主要的相互作用	注 释
瞬发 γ 射线	10^{-3}	直线	3×10^{10}	与大气	强度与光谱分布取决于炸弹设计
瞬发中子	10^{-3}	直线	$(1 \sim 5) \times 10^9$	与大气	与瞬发 γ 一样并在时间上延迟和展开
热X射线	3/4	直线	3×10^{10}	与大气	尖锐脉冲
可见光、 紫外线、红外线	很小	直线	3×10^{10}	大气选择吸收	强度与光谱取决于炸弹设计
射频与高频 电磁信号	很小	直线	3×10^{10}	在一定范围与 大气作用	与上面几种 ¹⁾ 可能的源一样
材料粒子	1/4	受地磁 场控制	2×10^8	与地球磁场和 大气相互作用	与上面几种 ¹⁾ 可能的源一样

注: 1) 指瞬发 γ 、瞬发中子、热X射线、可见光、紫外和红外线。

2.3.1 γ 射线

总的积分 γ 辐射约占总武器能量的5%,大约一半是瞬发 γ 射线,它与裂变-聚变过程本身有关。因为它们是在很稠密的材料内形成的,只有相当少的瞬发 γ 射线逸出,所发射的这些 γ 射线平均能量为3 MeV。到达远距离点的能量,由于其脉冲远远低于 $1 \mu\text{s}$,因此它的剂量率是所有核粒子发射中最高的。剩余的 γ 辐射是来自裂变碎片的缓发辐射。此外,在低空由中子俘获产生的 γ 射线也是重要的,主要是中子与大气中的氮相互作用。图6给出1 kt的空中爆炸的初始 γ 辐射强度随斜距的变化,假定为海平面的空气密度。

在任何辐射运输过程中，大气衰减是很关键的因素，而且必须仔细考虑到大气的密度变化和散射现象。

图 7 给出不同的武器当量 W 的换算因子 W' ，此处 W' 由下面的基本方程定义：

$$I_0 = \frac{3.61 \times 10^5 W'}{D^2} e^{-D/388} \quad (\text{C / kg}) \quad (2)$$

式中， I_0 为初始 γ 射线强度 (C/kg)； D (码) 为距 W 千吨 TNT 当量爆炸点的距离 (码 = 0.9144 m)。增加有效当量主要是由于稀薄效应 (rarefaction effect)，式 (2) 是距 W 千吨爆炸点为 D 码距离处的初始 γ 射线强度的通用公式，这种初始 γ 辐射包括瞬发 γ 射线和缓发 γ 射线，而且大约在爆后 1 min 终止^[5]。

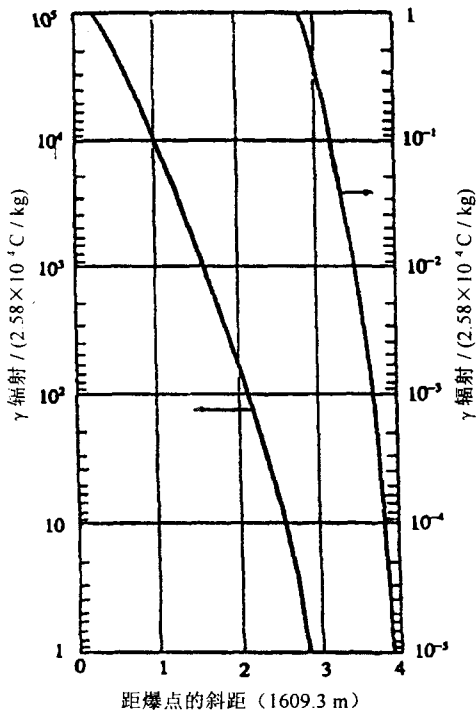


图 6 对于 1 kt 空中爆炸的初始 γ 辐射的照射量随距爆点斜距的变化

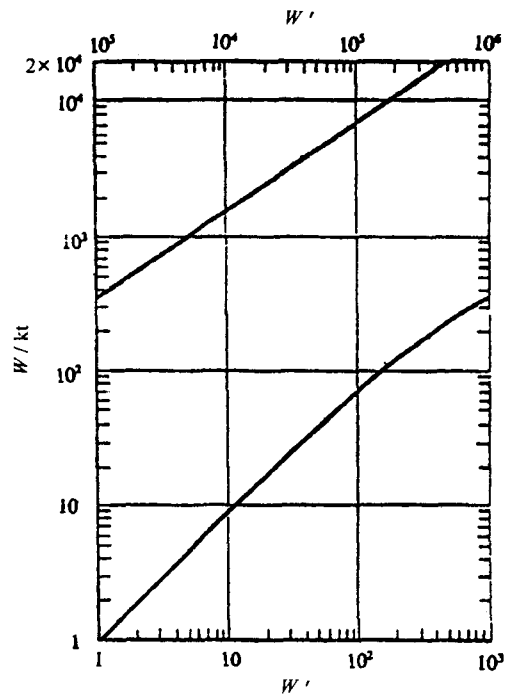


图 7 初始 γ 辐射照射量的换算因子

2.3.2 瞬发中子

核爆炸裂变反应给出很宽的中子能谱范围。氘氚 (DT) 聚变产生 14 MeV 的中子对非弹性散射很敏感，而且很快衰变到低能。它是一种热核反应，热核反应主要决定于瞬发中子，中子辐射比 γ 辐射具有较短的有效射程并且传播速度较慢。

2.3.3 缓发中子

在核爆炸期间发射的中子约有 99% 为瞬发中子，而且发射时间小于 1 μs 。剩下的 1% 是缓发中子，而且发射可以一直延续到爆后 1 min 的期间内，发射过程中大约有 9 种不同的同位素 (大部分是硼和碘)，因为这种缓发发射，其平均能量只有几百 keV，能量在 1 MeV 以上的只有很少的百分比。

虽然中子的传播速度没有光速快。但对于任何实际研究的距离，瞬发中子能在发射后 1 s 内被探测到。图 8 是对于 1 kt 当量的核武器作为距离的函数给出可以比较的中子与 γ 辐射强度。

2.3.4 β 发射

β 发射是由于裂变碎片的衰变引起的，因此它完全是缓发型的，它的时间经历非常类似于缓发 γ 辐射。

全部 β 辐射强度随距离呈急剧下降趋势， γ 射线具有最大的穿透性，除非极高能的武器（在百万吨范围内），否则瞬发辐射在距爆心大约 8 km 以外的范围就难以探测到。

所有的辐射都是在真空中传播得较远，8 km 左右的有效射程仅适合于海平面的空气密度。如果奈基-宙斯导弹观测系统都是在空中平台到高空完成的，那么长射程辐射就可能变成严重的公害，它不仅可以伤害或杀伤机组配备人员，而且也可以严重地损伤系统设备。高中子通量密度还可使光学玻璃变成深深的咖啡色。在一定的条件下，入射辐射在电子设备中可产生大量的电流而烧坏敏感元件。

表 5 给出 50% 裂变、50% 聚变的大当量核武器的辐射输出^[8]。

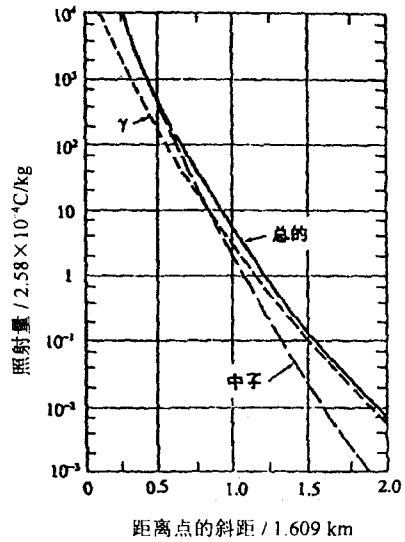


图 8 对于 1 kt 当量的核爆炸按距离的函数给出可以比较的 γ 辐射的中子的辐射强度

表 5 百万吨核爆炸释放的预估产物

辐射类型	特性	当量百分数 / %	
瞬发辐射	γ 射线	总的逸出能量 2×10^{12} J	
		平均能量 3 MeV	
	中子	平均贯穿质量 (空气) 30 g/cm ²	
		总的逸出能量 4×10^{13} J	
	中子数 1×10^{25}	1.0	
	平均能量 2.5 MeV		
缓发辐射	γ 射线	总的逸出能量 1×10^{14} J	3.0
		平均能量 MeV	
	β 射线	平均贯穿质量 15 g/cm ²	
		总的逸出能量 1×10^{14} J	2.5
		β 粒子数 4×10^{26}	
		平均能量 1.2 MeV	
	中子	平均贯穿质量 0.5 g/cm ²	
		中子数 1×10^{24}	$< 10^{-3}$
平均能量 1×10^{-1} MeV			

2.4 碎片云

核武器爆炸后剩下的物质，放射性非常高，含有裂变产物，俘获中子后的各种产物以及没有裂变的铀和钚。

在“麻栗树”高空核试验（和其它所有的高空核爆）中都产生了大规模的物理现象。在高空产生两个火球，在外面较大的一个火球是由于 X 射线被大气吸收而产生的，称为 X 射线火球，里面较小的一个火球是由于碎片膨胀产生的，在爆后 1 ms 火球是不对称的（见图 1），在辐射阶段测量垂直为 17 km，水平为 13 km。

在海拔 64~112 km 高度范围爆炸，由缓发 γ 辐射和 β 辐射引起的电离是主要的，电离的强度和位置由裂变碎片云的位置决定。爆炸之后，热 X 射线立即使大约爆炸总能量的一半沉积在距爆心几千米之内。若武器威力为百万吨级，则这部分能量可离解和电离该区域空气中的所有氧和氮分子，使该区域的温度升高几千度。由于空气温度突然增加而使空气压力相应地增加，这种力的不平衡使火球以高达 1.6 km/s 的速度向上冲去，使武器碎片达到海拔几百千米的高度，向上运动的碎片携带放射性粒子进入 γ 辐射射程极长的区域。于是，从裂变残骸中放射 γ 射线将在极大的范围内引起电离，但由于电离体积很大，所以电子浓度很低。

非常值得注意的是，碎片云（碎片火球）可以持续很久。如在距“麻栗树”试验爆心几百千米得到的照片仍能看出，一直到爆后 380 s 碎片火球才达到模糊的程度。在这一时刻碎片云的半径接近 180 km，而它的中心高度约达 400 km。总的火球尺寸（X 射线火球），其半径最终可达 600 km，而碎片云的半径为 200 km。此时，碎片云已变得很稀薄，研究它已无任何意义。在图 9 和 10 中给出了碎片云的增长曲线，图 11 给出了由于不同能源产生的火球半径。在表 6 中给出碎片云与其它形成物的重要尺寸^[6, 9]。

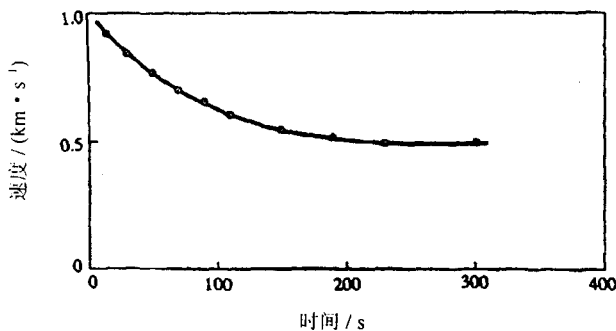


图 9 根据从夏威夷拍摄的照片推算的碎片云的径向增长速度

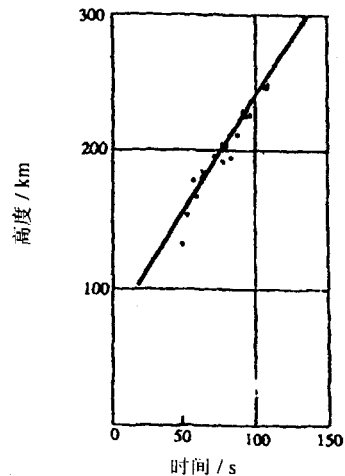


图 10 碎片云的高度随时间的变化

表 6 用彩色底片 (EGG) 记录的“麻栗树”试验的分析测量结果

爆后时间/s	碎片云 / km			冲击波“气球” / km			人造极光 / km	
	顶高	底高	宽度	顶高	底高	宽度	顶高	底高
30	164	低于地平线	46	332	110	292	306	202
54	201	160	99	483	116	552	300	204
96	290	200	150	584	160	684	323	226
120	326	228	185	700	166	825	308	226
160	394	271	197	800	184	1080	看不见	
187	413	306	210		超出照片		看不见	
225	478	324	276		看不见		看不见	
310	500	328	332		看不见		看不见	

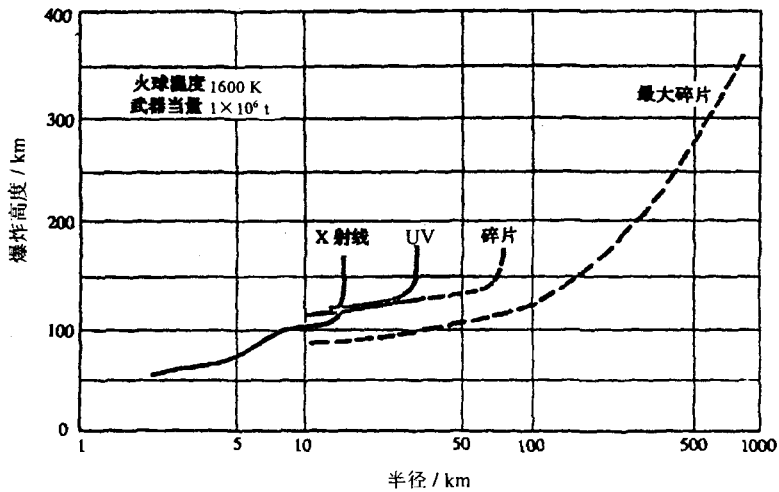


图 11 由于不同能源产生的火球半径

2.5 人造极光

人造极光是由高空核爆炸裂变产物在放射性衰变过程中释放的 β 粒子造成的。带电粒子在地磁场作用下被限制在磁力线上作螺旋运动。核爆炸形成的 β 粒子在受到这种束缚而进入大气时，它们激发了空气中的原子和分子，多余的能量以光子能量形式再度释放出来，这就形成了极光的可见辐射。

β 粒子沿磁力线抵达共轭点的时间不等，因而有远近极光之分。但由于 β 粒子从爆点沿磁力线抵达另一半球的共轭区所需要的时间非常短（几分之一秒），所以远极光很快就可观测到。美国“麻栗树”和“香橙”核试验后，在北半球约翰斯顿岛东北的夏威夷观测到近极光，而在南半球的阿卑亚观测到了远极光（见图 12）[1, 3, 10~12]。

在“麻栗树”试验中，在爆后 0.6 s 观测到人造极光并且指向北方，紧接着在南方观测到第二个人造极光，但这个分支很弱并且很快消失，这两种极光直接与火球有关。北方极光的峰值亮度接近火球的亮度约为 $10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，但很快下降，在 +20 s 测量值为 $2 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。这种在亮度方面的下降，随产生的裂变产物的衰变速率而变化。

从 β 产额与大气相互作用的分析可见，在极光形成期间转换效率（通过大气/能量沉积后放出的能量）是 10%。

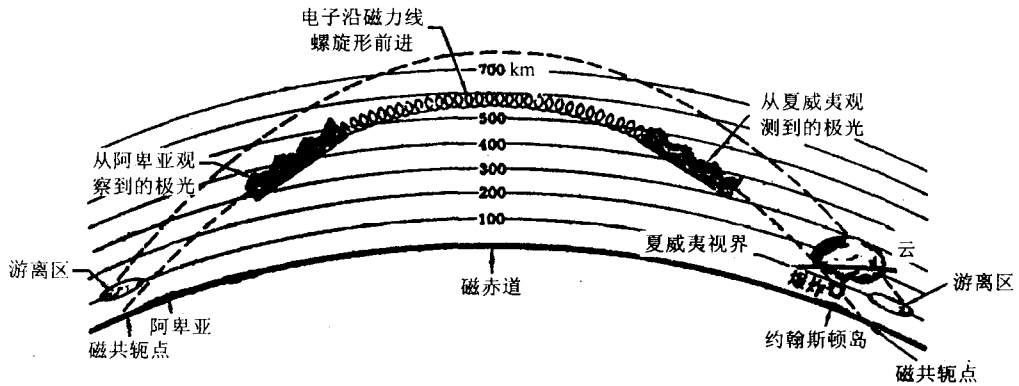


图 12 高空爆炸中出现的现象

当一枚核武器在高空爆炸时，仅一小部分裂变材料在质量—能量转换过程中被破坏，剩下的作为碎片云向外散开。这些裂变产物的衰变产生大量的 β 粒子，因为 β 粒子带电与地球磁场相互作用，这种相互作用引起 β 粒子按螺旋轨迹前进，所以 β 粒子不是向南就是向北沿着磁力线作螺旋前进运动。

β 粒子的产生使碎片云扩展并同时使其上升，这种碎片云半径可达到 200 km（见图 11），而且上升时间可达 250 s。但是碎片球并不是一个自由膨胀体，碎片被强烈地电离并作为云膨胀，磁力线被排开，因此产生一个磁瓶，该磁瓶成为集中 β 射线使其进入的一根管子，这个管子具有一个比碎片球直径小得多的直径。当电子沿磁力线向下作螺旋运动并进入稠密大气时，这些电子激发上层大气并产生与自然极光相当接近的效应。因此这种人造极光的几何图形取决于碎片云的扩展和合成磁瓶的性质。

据“麻栗树”试验所作的粗略估计，产生人造极光的电子通量为 6×10^9 粒子/cm²·s，这与强的自然极光近乎一致，尽管自然极光包括正粒子和电子^[3, 11]。

应当注意火球与极光结合的最终面貌以及极光的余辉时间。在“麻栗树”试验中，由于爆高为 76 km，向下发射的电子几乎立刻在稠密的空气中被阻止，而被阻止的电子把它们的大部分能量沉积在电子路径的末端。极光应是以窄的波前形式随着扩展的碎片云向外运动，极光呈现极复杂的马蹄形在很宽的区域拖影并持续相当长的时间周期，这是因为电子是逐渐损失能量而且不会立刻接近路径终端，在亚稳态中激发了大量的原子，因此在很长的时间出现辐射发射。

在光谱学上，人造极光稍微类似于自然极光，突出的光谱带主要是由 N_2 和 N_2^+ 发射的。极光的颜色呈紫红色，这很像低空自然极光。如果人造极光与低空自然极光属同样的家族，则由 O，N 原子和 O_2^+ 离子形成的谱线也应出现。图 13 和图 14 给出“麻栗树”极光的时间—强度特性^[4]。

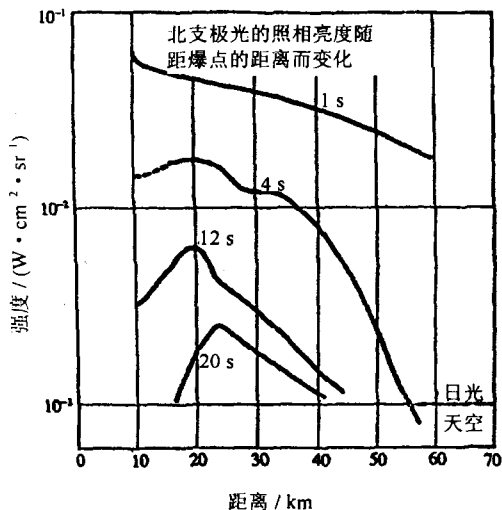


图 13 “麻栗树”核试验人造极光的距离-强度特性

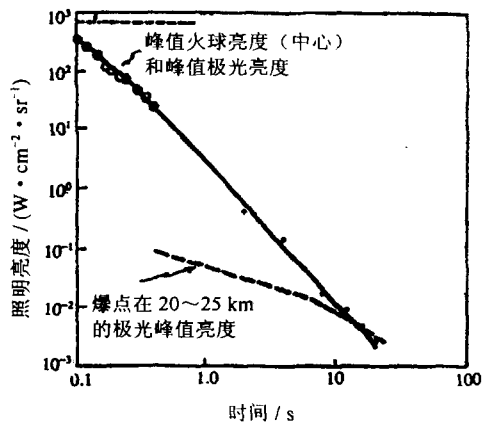


图 14 “麻栗树”高空核爆的人造极光时间-强度特性

2.6 共轭极光

从围绕核爆炸点的区域考虑，另一个感兴趣的区域位于另一半球的磁共轭点附近。对于“麻栗树”试验，这个位置位于太平洋上空，相当接近萨摩亚群岛 (Samoa)，这些效应是在这个岛上的观测站测到的。

由于“麻栗树”试验共轭极光基本上是与爆炸同时出现的（因为 β 粒子的运动速度为 2000 km/s）。极光光线大约持续 6 min，“首先是紫色包含着红色并且逐渐变成绿色”，随后是红色辉光，持续了 8 min。同时在共轭点的北方也看到红色弧光。

共轭极光的紫色类似于接近火球所观察到的，因此它可能是两种极光所产生的一种相互接近的关系，这种颜色应归因于 N_2^+ 离子，红色的盖子归因于 N_2^+ 被 O^- 或 O_2^- 离子相互中和，而颜色逐渐变成绿色则认为是在强度上的简单衰退。红色和紫色比绿色具有较高的可见阈值，由于离子-原子交换和离解复合，最终可能产生深红色弧光。

“麻栗树”的共轭点距爆炸点 3600 km，极光的产生带来各种不同的电磁扰动，如对远距离的观测仪器就产生了严重的干扰。

2.7 人造辐射带

如上所述，高空核爆炸裂变产物衰变成大量的 β 粒子，瞬发中子衰变成质子和电子，其中一部分被地磁场捕获，这些带电粒子按照螺旋线方向围绕地磁场磁力线来回运动从北面运动到南面的“反射点” (mirror points) 再返回，每秒往返多次。与此同时，这些带电粒子在地球南北纬度之间向东西两个方向振动，带负电荷的向东运动，带正电荷的质子和其它粒子向西运动，因此这些粒子便可围绕地球在高空形成一个厚度均匀的带电粒子薄壳，覆盖全球并可存在长达数日之久。在较低高度上的“反射点”是由于磁力线会聚形成的，所以能够把带电粒子再次反射到空间去。从地球看上去只能看到薄壳的半面。在“百眼巨人”试验中产生的人造辐射带形似“C”字，“C”字弧顶在赤道上方大约 6400 km。这个人造辐射带恰好在两个天然辐射带—范·阿伦辐射带之间（两个天

然辐射带中第一个带电粒子辐射带在赤道上方 2240~5440 km 之间,第二个是在 12800~19200 km 之间)。

人造辐射带的强度约为 $2.58 \times 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 当然这不可能是很精确的。

3 高空核爆炸对导弹和空间飞行器上航空电子学系统的影响

众所周知,核爆炸产生若干短寿命辐射,这种辐射在距爆炸几十千米范围内可使导弹或空间飞行器上的航空电子学系统暂时失灵或永久损坏。

高能(快)中子是与质子质量接近的粒子,但没有电荷,大部分快中子是在 $1 \mu\text{s}$ 的裂变过程中释放出来的。当中子撞击到一种材料上时,中子就像高速弹丸一样,引起材料内部结构的物理位错,通常能产生永久损伤,尤其是在半导体中,半导体器件的有效工作依赖于已有的有序的晶体点阵结构。

γ 射线的辐射波长很短,它以光速传播,核爆产生的瞬发 γ 射线,持续时间不大于几微秒。核武器在空中爆炸后,其裂变碎片形成一种气体云产生缓发 γ 射线,爆炸后在中等高度(几十千米)可持续 1 min,这类 γ 射线也包括由空气中的氮原子俘获的中子产生的 γ 射线,这类总的缓发 γ 射线可持续相当长的时间,大约比瞬发 γ 射线存在的时间长 100 倍还要多。但是瞬发 γ 辐射的极高的照射量率却可对航空电子学设备造成很严重的影响。

能量低于 γ 射线的 X 射线也是由核爆炸产生的。在低空 X 射线很快由空气吸收,但是在高空,如像洲际弹道导弹的飞行高度, X 射线可以传播相当大的距离。X 射线被敌方导弹壳体表面一薄层吸收后形成热击波,可造成导弹壳体的层裂。X 射线加热导弹壳体,使其防热层烧蚀。X 射线对来袭导弹壳体照射的不均匀性可造成整体剪切效应,破坏导弹壳。热击波直接向导弹壳体内传播,使其战斗部或部件遭受破坏。

中子对来袭导弹的破坏作用有三个方面的:

(1) 引起来袭导弹内核装置过早点火。所谓“过早点火”是指来袭弹头的核材料在未被压缩得很好时,即超临界度不大时,由于反导核爆进去的瞬发中子和缓发中子的作用,使来袭核装置过早点火,而使进攻失败。对于百万吨级的高空核爆,其中子的杀伤半径可达几百千米。

(2) 中子引起核材料熔化。中子打到来袭弹头的活性区,由于引起裂变和其本身所携带的能量,可使活性区的温度升高很多,从而使核材料熔化。对于百万吨级高空核爆,中子引起核材料熔化的杀伤半径可达 200~700 m。

(3) 中子对导弹内的电子学元件和线路的辐照损伤。电子学线路和元件经中子照射后,可以失灵,所需要的积分中子通量为 $10^{14} \sim 10^{16}$ 中子/ cm^2 。百万吨级的高空核爆炸破坏半径可达几百米至几千米。

当 γ 射线和高能 X 射线由一种材料吸收时可以产生几种暂时效应。对于航空电子学设备最重要的破坏是电离,电离使电子从某些原子中被逐出。这可能使绝缘体变为导体和有害的内部电流,这种电流叫做光电流,它在半导体设备中流动。通常在 γ 辐射消失后不久,设备便恢复原有特性。

但是在导弹制导系统中的航空电子学设备的短暂失效，可能使一颗 ICBMs 无可挽救地错误导向或引起它的弹头爆炸失灵或过早爆炸。

在某些情况下，瞬态失灵可能引起永久失效。例如在半导体微电路中的极强的内部电流可以烧毁金属内引线，使该电路处于永久性损坏状态。除非采取校正测量。

由热核武器产生的中子比由一个裂变弹产生的中子能量更高，而且产生的中子数可以通过合理的弹头设计来增加。例如，一个反弹道导弹弹头就可以达到这一点。为了摧毁 ICBMs，可把短射程的斯普林特反弹道导弹设计成使用中子和冲击波两种形式的。

中子传播要比光速慢得多，但如在射程内，中子会对航空电子学系统构成一种潜在的威胁。中子通常在爆后 1 s 内到达。为了说明半导体设备易受这种瞬发辐射的攻击，下面两个例子是基于空间核爆炸而且在空间也有航空电子学系统，在可比较的空间高度上用航空电子学系统与低空爆炸对比。

在标准的（未加固的）线路中使用的常规半导体设备的易损性阈值大约为 10^{17} 中子/m²。如果在空间爆炸一颗常规的百万吨级核装置，大约在距爆心 32 km 处中子注量至少为 10^{17} 中子/m²。如果同样的武器在低空爆炸，由于大气衰减关键性的中子注量仅在大约 900 m 处存在。

在非逻辑电路中可以引起瞬态失灵的 γ 瞬时辐射损伤阈值大约是 $5 \times 10^5 \sim 10^7$ Gy/s*。空间爆炸一枚百万吨级核武器时，在距爆点约 160 km 处可以产生 10^5 Gy/s γ 射线吸收剂量率，而在低空这种有威胁的距离大致降到 1.6 或 3 km。在这样的距离范围，冲击波和热辐射（火球烧蚀）可以构成严重的威胁。

为了估计核爆炸产生的各种辐射脉冲的损害结果，表 7 给出了几种折衷选择的参考数值，因为不同的电子器件与线路以及抗辐射加固的条件非常复杂，各有自己的损伤阈值，这些给出的数值是指电子设备适应军事环境要求的能力。

在图 15 中给出作为核爆炸各种能量产额函数的 TNT 当量的杀伤半径范围（灵敏阈的距离）^[13]。

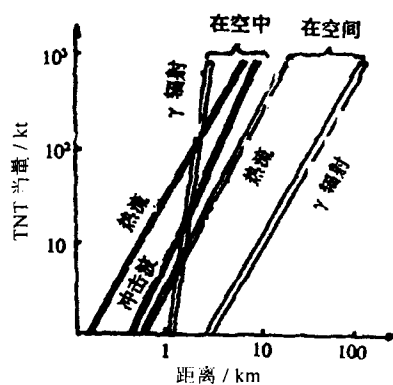


图 15 作为爆炸产额函数的 TNT 当量的杀伤半径范围

表 7 电子设备对核爆炸释放出来的各种能量的敏感性阈值

γ 或 X 射线总照射量	2.58×10^3 C/kg	
总的中子注量	$10^{14} \sim 10^{15}$ 中子/cm ²	($E_n = 1$ MeV)
总的热流	10^2 cal	
峰值超压（在空气中）	34474 Pa	
γ 或 X 射线峰值吸收剂量率	10^7 Gy/s	

* 在本文中吸收剂量 Gy 均指 Si 中的吸收剂量 Gy (Si)。

4 对美苏高空核试验的效果与作用的评估

1958年8月27日、30日和9月6日美国在南纬45°（非洲与南美洲之间）南大西洋480 km高空爆炸了三颗TNT当量为1 kt的小型原子弹，这些试验的代号为“百眼巨人”（Argus）。三颗原子弹都是用洛克希德公司的X-17三级固体燃料火箭发射的。这些试验为武器的发展拓宽了道路。

在进行“百眼巨人”试验前后，美国海军从维基尼亚州瓦勒浦岛、佛罗里达州卡纳维拉尔角和波多里哥的莱梅空军基地三处先后发射了16枚五级火箭，火箭的有效载荷约是27 kg，平均发射高度为880 km。此外，“百眼巨人”试验前一个月发射的“探险者”VI号卫星，大约通过“百眼巨人”试验产生的人造辐射带250次，于当年9月底电池电能耗尽之前记录了人造辐射带的位置、强度和逐渐衰减情况。

高空核试验产生了许多具有现实军事意义的问题，特别是“百眼巨人”试验之后，引起了载人飞行器、导弹等方面设计人员的极大关注。

高空核试验向科学家表明，利用核弹在空间爆炸，可以使人们按照自己的需要产生人造粒子、人造辐射带，以供科学家们研究很多天体物理与地球物理问题，如太阳如何影响上层大气和地球、地球磁场、两条“范·阿伦”天然辐射带的产生机制以及许多目前尚不清楚的问题。

对于武器设计师来说，高空核试验向专家们提出了警示，这些试验对现有的武器系统和通讯系统，特别是对用无线电制导的洲际弹道导弹（ICBM）、环球无线电通讯和“奈基-宙斯”反导弹系统有着重要影响。

从军事观点看，高空核爆炸无论对远距离单波段通讯、用雷达进行高空探测，还是用无线电或雷达准确地控制导弹的飞行高度都将受到严重影响。一位军事科学家说：“百眼巨人”很像在进攻城市之前投到电话总机室里的一颗手榴弹，如果投得适时的话，可以使敌人的整个防御系统瘫痪。但这也告诉敌人，进攻开始了。美五角大楼尖端技术研究局主任约翰逊1959年在国会作证时说：“如果在印度洋上空适当高度爆炸大当量原子弹，便会使莫斯科附近的无线电通讯处于“死寂状态”。发生这种现象，是由于核弹在高空爆炸后产生人造极光的结果。在“百眼巨人”试验时，在南大西洋靠近注入粒子的区域形成了人造极光，在北大西洋的亚速尔群岛出现了另一个极光。

出现人造极光为什么就会破坏无线电通信呢？因为极光是由电子轰击空气中的分子与原子而形成的，其结果是极大地降低了大气上层的传导性，对电离层形成了巨大的扰动，而使无线电波不能通过。

由约翰逊的国会证词使我们不能不联想到在六七十年代为什么美苏的军舰与核潜艇在印度洋游弋不停并常在此滋生事端？可见当时把战略要地的地磁共轭区都视为军家必争之地。

我们从表1中不难看出，通过高空核试验使美苏弄清了反导破坏机制、核爆的能量分配、破坏效应和杀伤半径，测定了高空核爆炸在破坏电子预警系统、防御敌方袭击方面的作用，为研究突防和反弹道导弹提供了实验数据。尤其是高空核爆炸使无线电通讯受到数小时干扰。1962年7月9日美国做了代号为“海盘车”的140万吨当量的高

空（400 km）核试验，使美国通讯中断了 20 min，这种结果提醒人们重新认识“以核反核”的有效性，如果这种末段拦截是在防守方的上空，虽然可成功地拦截第一颗来袭弹头，那么恰在爆后雷达、无线电通讯中断时期，第二批来袭弹头到达上空怎么办？

美国导弹防御研究人员建议利用辐射作为反弹道导弹的杀伤机制。一种是利用中子穿透敌方核弹头产生大量热量足以使导弹材料熔化，致使弹头不能爆炸；另一种是利用大气层以上的热核爆炸产生高温 X 射线来破坏 ICBM 的弹头防热层，同时产生热击波。此外，中子、 γ 射线和 X 射线都能破坏弹头中的半导体元件。

美国防部官员供认，“卫兵”系统中的远程“斯巴坦”反弹道导弹是基于高温 X 射线作为杀伤机制，近程“斯普林特”导弹是利用中子和冲击波两种杀伤机制。

据 H.T. 席孟斯在 1959 年 5 月“陆军”杂志撰文披露，美在 1958 年夏天于太平洋约翰斯顿岛进行的高空核试验曾研究过用中子辐射破坏弹头是否比用反弹道导弹的热效应来得更加有效，结果证明确实有效。

尤其令人值得倍加关注的是，原苏联曾于 1961 年 10 月 27 日在卡普斯亨-亚尔火箭试验场同时做了两次外空核试验，据称原苏联此次进行了热核拦截试验。这种拦截试验可以澄清许多“反导突防”方面的各种问题，对核武器的研制起着重要作用。

时至今日，尽管俄罗斯痛失超级大国地位，经济上濒临崩溃，但也不甘寂寞。据载 1998 年 12 月 27 日俄罗斯导弹团在俄南部萨拉托夫州开始战斗值班，该导弹团是俄第一个装备可机动发射、射程达 10000 km 的 10 枚新型“白杨—M”战略导弹的部队。这标志着俄罗斯战略导弹计划迈出了第一步。俄罗斯第一副总理马斯柳科夫宣称：1998 年和 1999 年各部署 10 枚“白杨—M”，2000 年“白杨—M”数量增加到 40 枚，从 2000 年起每年至少生产 35~40 枚。可见俄在努力找回昨日的辉煌。

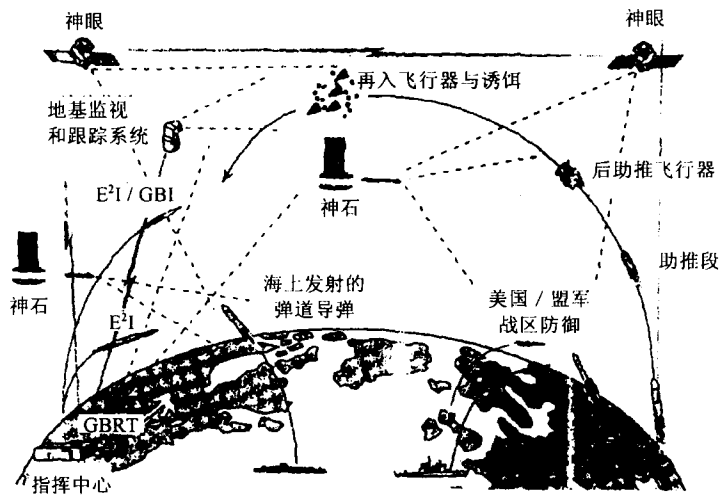


图 16 全球防御有限打击系统 (GPALS)

E²I—外大气层拦截器；GBI—地基拦截器；GBRT—地基雷达跟踪。

据美联社华盛顿 1998 年 12 月 6 日电, 美国政府和英特尔公司联袂研制一种防辐射的计算机芯片, 它有助于保护卫星在太空不受核爆炸的影响。1998 年 12 月 7 日出版的美国《防务周刊》说, 这种新芯片有朝一日将使得卫星和其他太空飞行器上的系统能够经得住核爆炸的影响。文章说, 美国情报机构越来越担心潜在的敌人可能采用向空间发射一枚核武器并使它在空间爆炸的办法, 来中断卫星侦察和通信^[14]。

尽管至今距美国第一次高空核试验已经 40 年了, 对美国来说, 苏联解体后遭受数千枚弹道导弹“万箭齐发”的全面攻击的可能性业已消失, 但美国却面临防御数百枚弹道导弹攻击的可能性。为保护美国及其盟国的利益, 美国在 1991 年提出“全球防御有限打击系统”(GPALS)(见图 16)代替星球大战计划(SDI)。而海湾战争表明, 在苏联全面威胁不断下降的同时, 对美国重大利益构成地区性威胁却不断增长。在这种新形势下, 美国提出了战区导弹防御计划(TMD)。将拦截武器的主流由原来的天基星球大战武器转移到地面发射的拦截导弹上, 积极推进爱国者导弹 PAC-3、延长射程拦截导弹(ERINT)、战区高空区域防御(THAAD)和配置在海上、空中的反导武器的开发计划。

参 考 文 献

- 1 Glasstone, Samuel, Editor. The Effects of Nuclear Weapons. Prepared by Department of Defense, published by the AEC (June 1957)
- 2 The Teak Skyglow, Technical Opens., Inc.. TO-4837 Report on contract AF 19(604)-6140 (31 Oct.1960)
- 3 Hoerlin H, et al. Teak Phenomenology. LAMS-2417 (19 February 1960)
- 4 AD-417089 (1963).1~124
- 5 Capabilities of Atomic Weapons. AFL 136-1 (November 1957)
- 6 Stubbs H E, et al. Infrared Radiation Generated by a Nuclear Detonation. GCA Technical Report 61-19-A (10 May 1961)
- 7 Sen H K, Guess A W. The Role of Radiation in Shock Propagation with Applications to Altitude and Yield Scaling of Nuclear Fireballs. Air Force Surveys in Geophysics, No.114 (Sept.1959)
- 8 Christian R H, et al. Research Studies in Nuclear Effects in the Upper Atmosphere. Tempo Final Report, AFSWC TR-60-29 (15 May 1960)
- 9 Barstow F E, et al.Feasibility Study for Photographic Coverage of Operation Willow High Altitude Detonations, (C DI), Edgerton, Germishausen,and Grier. B-2132 (10 August 1960)
- 10 Westervelt D R. Air Fluorescence in the Upper Atmosphere and its Relations to the Detections of Nuclear Explosions in Space. LAMS J-10-511 (19 June 1959)
- 11 Latter A L, Mcmillan W G. Aurora from the Teak Shot, The Rand Dorporation (17 June 1959)
- 12 Hillendahl R W. Characteristics of the Thermal Radiation from Nuclear Detonations. AFSWP-902 (30 June 1959)
- 13 Crittenden J R. IRE Wescon Convention Record, Part.6. August 23-26,1960
- 14 Defense week, December 7,1998. 4~12

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告. CNIC-01389, CAEP-0027: 高空核爆炸和美苏高空核试验的述评 / 孙景文著. —北京: 原子能出版社, 1999. 11

ISBN 7-5022-2056-9

I. 中… II. 孙… III. 核技术-中国-研究报告 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29759 号

原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16 · 印张 3/2 · 字数 28 千字

1999 年 11 月北京第一版 · 1999 年 11 月北京第一次印刷

印数: 1—200

定价: 5.00 元

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-2056-9



9 787502 220563 >